

# 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划

王秀丽, 李淑慧, 陈皓勇, 王锡凡, 梅姚  
(西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

## Multi-objective and Multi-district Transmission Planning Based on NSGA-II and Cooperative Co-evolutionary Algorithm

WANG Xiu-li, LI Shu-hui, CHEN Hao-yong, WANG Xi-fan, MEI Yao

(Department of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Fast non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), a new multi-objective genetic algorithm, is applied to transmission planning for the first time. Simulation results illustrate that NSGA-II has better convergence and flexibility and provides an effective tool for measure the performance of different objective functions. For large scale and multi-area transmission systems planning, the cooperative co-evolutionary algorithm combined with NSGA-II is adopted to overcome some disadvantages of GA such as premature convergence. Sub-system which is optimized by NSGA-II coevolves with other sub-systems. A practical system planning shows it can give satisfy results for such problems.

**KEY WORDS:** transmission planning; multi-objective; NSGA-II; co-evolutionary algorithm

**摘要:** 基于快速分类的非支配遗传算法(NSGA-II)是一种新型的多目标遗传算法,文中首次将其应用于电网优化规划。多个算例分析表明 NSGA-II 算法在电网规划中具有良好的优化效果,为各目标之间的权衡分析提供了有效的工具;协同进化算法采用分解-协调的思想处理复杂系统的演化,可以克服当优化问题规模扩大时,常规进化算法易于出现过早收敛的现象。据此提出将协同进化算法和 NSGA-II 算法相结合,以用于处理大规模多区域的电力系统规划问题,在各子网采用 NSGA-II 算法优化的过程中进行多区域协调。与常规遗传算法相比,算例分析取得了更好的规划结果。

**关键词:** 输电网规划; 多目标优化; 非支配遗传算法-II; 协同进化

基金项目:国家基础研究专项经费项目(2004CB217905); 国家自然科学基金项目(50207007)。

Project Supported by National Basic Research Foundation of China (2004CB217905) and National Natural Science Foundation of China (50207007).

## 0 引言

随着电力系统规模的不断扩大,电网规划涉及的目标越来越多,但是这些目标往往具有不同重要性甚至相互矛盾。传统的多目标优化方法主要是集成的方法,如权重法、约束法和目标规划法等。它们是将多目标问题转换为单目标后,再采用比较成熟的单目标优化算法求解。目前电网规划中普遍采用此法,规划中考虑的各因素在总目标中所占权重的改变将影响整个目标网架的优化。传统的多目标优化方法不能很好的解决这个问题。

多目标遗传算法是用来解决多目标优化问题的一种进化算法<sup>[1-2]</sup>。其核心就是协调各目标函数之间的关系,找出使各目标函数能尽量达到比较大(或比较小)的最优解集。基于快速分类的非支配遗传算法(NSGA-II)是一种新型的多目标遗传算法。本文首次提出将 NSGA-II 算法应用于电网规划,并取多个算例进行了测试,计算结果表明, NSGA-II 算法得到的非劣解在目标空间分布均匀,算法收敛性和鲁棒性好。NSGA-II 算法为多目标电网规划各目标之间的权衡分析提供了有效的工具。

当电力系统优化问题规模扩大时,常规进化算法易于出现过早收敛的现象,限制了其实际应用。协同进化算法采用类似分解-协调的思想处理复杂系统的演化,能有效地克服这些缺陷<sup>[3]</sup>。本文提出将协同进化算法和 NSGA-II 算法相结合用于大规模电网规划中,与常规遗传算法规划结果相比,协同进化算法得到了更好的优化结果。

## 1 多目标电网规划的设计原理和方法

### 1.1 多目标电网规划模型

一般电网规划考虑的因素包括一次性建设投资、运行费用和网损费用等,将这些因素分别作为多目标优化问题的目标,建立多目标规划模型如下<sup>[4]</sup>:

$$\min f_1 = AP(i, n) \sum_{i \in D} K_i x_i l_i \quad (1)$$

$$\min f_2 = \sum_{i \in E} Pen_i W_i \quad (2)$$

$$\min f_3 = T \sum_{i=1}^{NB} K_2 r_i P_i^2 \quad (3)$$

式中:  $f_1$  为目标函数 1, 为方案的建设投资等年值费用;  $D$  为新建线路集;  $K_i$  为单位长度线路造价;  $x_i$  为决策变量, 第  $i$  条待选线路的回路数;  $l_i$  为第  $i$  条线路长度;  $f_2$  为目标函数 2, 为网络安全约束的惩罚项;  $W_i$  为第  $i$  种网络约束, 如过负荷约束等;  $Pen_i$  为第  $i$  种网络约束的惩罚系数。  $f_3$  为目标函数 3, 为年网损费用;  $T$  为年网损小时数;  $N_B$  为网络支路数;  $K_2$  为单位电价;  $r_i$  为第  $i$  条线路的电阻;  $P_i$  为正常运行方式下第  $i$  条线路上的功率潮流。  $A_p(i, n)$  为资金回收系数:

$$A_p(i, n) = i(1+i)^n / [(1+i)^n - 1] \quad (4)$$

其中  $i$  为资金贴现率,  $n$  为贴现年限。

需满足的约束条件如下:

$$\text{正常情况为} \quad \begin{cases} P = Bq \\ P_i = B_i \Delta q \\ |P_i| \leq P_{i\max} \end{cases} \quad (5)$$

$$N-1 \text{ 检验为} \quad \begin{cases} P = B'q' \\ P_i' = B_i' \Delta q' \\ |P_i'| \leq P_{i\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P$  为节点注入功率向量, 为发电出力与负荷之差;  $B$ 、 $B'$  为正常和  $N-1$  情况下的节点导纳矩阵虚部;  $q$ 、 $q'$  为正常和  $N-1$  情况下的节点电压相角;  $P_i$ 、 $P_i'$  为正常和  $N-1$  情况下的支路潮流;  $\Delta q$ 、 $\Delta q'$  为正常和  $N-1$  情况下的支路两端相角差;  $P_{i\max}$  为支路允许通过的最大容量。

### 1.2 多目标遗传算法

多目标遗传算法的核心就是协调各目标函数之间的关系, 找出使各目标函数能尽量达到比较大(或比较小)的最优解集。1989年 Goldberg 首先提出了基于 Pareto 最优解的概念计算个体适应度的方法, 借助非劣解等级的和相应的选择算子使种群在优化

过程中朝 Pareto 最优解的方向进化<sup>[5]</sup>。这种思想已产生了多种基于 Pareto 最优解的多目标遗传算法(multiobjective genetic algorithms, MOGAs), 如 FFGA、NPGA、NSGA、SPGA 等<sup>[6-7]</sup>。其中 NSGA 算法是最直接体现 Goldberg 思想的方法。

NSGA 是由 Srinivas 和 Deb 于 90 年代初期提出, 它是基于个体的等级按层次来分类的<sup>[1]</sup>。NSGA 与简单遗传算法的主要区别在于选择算子的不同。在进行选择操作之前, 首先找出当前种群中的非劣最优解, 所有这些非劣最优解构成第一个非劣最优解层, 并给其赋一个大的假定适应值。为了保持群体的多样性, 这些非劣最优解共享它们的假定适应值, 然后以同样的方法对种群中剩下的个体进行分类, 下一层的共享假定适应值该值要小于上一层的设定值, 这一过程继续进行直至群体中所有个体都被归类。NSGA 的高效性在于运用一个非支配分类程序, 使多目标简化至一个适应度函数的方式。运用该方法, 能解决任意数目的目标问题, 并且能够求最大和最小的问题。

印度科学家 Deb 于 2000 年在 NSGA 的基础上进行了改进, 提出了 NSGA-II<sup>[8]</sup>, 一种快速的非劣性排序方法(fast-nondominated-sorting): 定义了拥挤距离(crowding distance)估计某个点周围的解密度, 取代适应值共享。NSGA-II 有效地克服了 NSGA 的三大缺陷: 计算复杂性从  $O(mN^3)$  降至  $O(mN^2)$ , 具备最优保留机制及无需确定一个共享参数。从而进一步提高了计算效率和算法的鲁棒性。

## 2 基于 NSGA-II 算法的多目标电网规划

### 2.1 基于 NSGA-II 算法多目标电网规划的设计

NSGA-II 算法也已经在一些实际工程中得到了广泛应用<sup>[9]</sup>。本文尝试把 NSGA-II 算法引用到多目标的电网规划中。其方法为:

(1) 编码。单阶段网络规划中待选线路只有 2 种状态(架设与不架设), 因此用 0-1 整形变量来编码非常合适。本文采用逐线编码的方法, 当基因值为 1 时表示相应的待选线路被选中加入网络; 反之, 表示相应的待选线路没有被选中。染色体的长度应等于待选线路的个数, 即每个染色体代表一个扩建方案。如染色体(01001101)表示共有 8 条待选线路, 线路 2、5、6、8 被选中加入网络。

(2) 虚拟适应度的计算。在 NSGA-II 算法中, 个体的适应度包括非劣解的等级和个体的虚拟适应度。为了保持个体的多样性、防止个体在

局部堆积, NSGA-II 算法首次提出了虚拟适应度(dummy fitness)的概念。它指目标空间上的每一点与同等级相邻 2 点之间的局部拥挤距离。例如, 图 1 中目标空间第  $i$  点的拥挤距离等于它在同一等级相邻的点  $i-1$  和  $i+1$  在  $f_1$  轴和  $f_2$  轴距离的和, 即由点  $i-1$  和  $i+1$  组成的矩形 2 个边长之和。使用这一方法可自动调整小生镜(niche), 使计算结果在目标空间比较均匀地散布, 具有较好的鲁棒性。

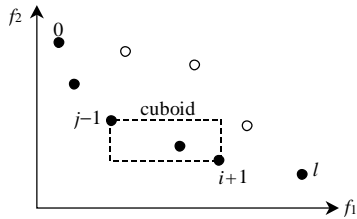


图 1 局部拥挤距离示意图  
Fig. 1 Local chart of crowding distance

具体实现时, 首先解码染色体, 然后按电网规划数学模型计算每个个体相应的目标函数, 再根据目标函数值进行非劣分层, 计算每层个体的虚拟适应度。虚拟适应度的计算步骤如下:

- 1) 对同层的个体初始化距离。令  $L[i]_{dis} = 0$ ;
- 2) 对同层的个体按第  $m$  目标函数值升序排列。

令  $L = sort(L, m)$ ;

- 3) 使得排序边缘上的个体具有选择优势, 给定一个大数  $L[1]_{dis} = L[N]_{dis} = M$ ;

- 4) 对排序中间的个体, 计算拥挤距离为

$$L[i]_{dis} = L[i]_{dis} + L[i+1]_{dis} - L[i-1]_{dis}$$

式中  $L[i]_{dis}$  为第  $i$  个体的第  $m$  目标函数;

- 5) 对不同的目标函数, 重复步骤(2)~(4)操作。

(3) 选择运算。选择过程使优化朝 Pareto 最优解的方向进行并使解均匀散布。选择算子的作用是为了避免有效基因的丢失, 使高性能的个体得以更大的概率生存, 从而提高全局收敛性和计算效率。采用轮赛制选择算子, 即随机选择 2 个体, 如果非劣解等级不同, 则取等级高(级数小)的个体。否则, 如果 2 点在同一等级上, 则取比较稀疏区域内的点, 因此它可使进化朝非劣解和均匀散布的方向进行。设每一个体  $i$  的非劣解等级属性和局部拥挤距离属性分别为  $i_{rank}$  和  $i_{dis}$ , 随机选取 2 个体并进行比较, 保留 1 个优良个体, 淘汰另一较差个体。其过程为  $if(i_{rank} < j_{rank}) or [(i_{rank} = j_{rank}) and (i_{dis} > j_{dis})]$  then  $i > j$  or else  $i < j$

- (4) 精英策略。精英策略即保留父代中的优

良个体直接进入子代, 它是遗传算法以概率 1 收敛的必要条件。采用的方法是: ①将父代  $P_t$  和子代  $Q_t$  全部个体合成为一个统一的种群  $R_t = P_t \cup Q_t$  并放入进化池中, 种群  $R_t$  的个体数成为  $2N$ ; ②将种群  $R_t$  按非劣解等级分类并计算每一个体局部拥挤距离, 依据等级的高低逐一选取个体, 直至个体总数达到  $N$ ; ③以此形成新一轮进化的父代种群  $P_{t+1}$ , 其个体数为  $N$ 。在此基础上开始新一轮的选择、交叉和变异, 形成新的子代种群  $Q_{t+1}$ 。

基于方法 1~4 可得设计的算法流程如图 2 所示, 在图中标号第 3 和第 6 框中对种群  $P_t$ 、 $R_t$  进行非劣性分层, 计算拥挤距离之前, 需要先对种群中每个个体计算线路扩建费用, 网络潮流, 进行  $N-1$  校验分析, 染色体修复, 求得各目标函数值, 以作为非劣性分层的依据。

## 2.2 算例分析

Garver-6 节点系统<sup>[4]</sup>是目前国内外规划研究所广泛采用的实验电网。为了验证 NSGA-II 算法的有效性和可行性, 采用 NSGA-II 算法对该系统进行规划。这里, NSGA-II 算法的目标函数设为式(1)~(3)。计算标么值时, 功率基准值  $S_B = 100$  MVA; 单位长度造价取为 50 万元/km; 单位电价取为 0.3 元/kWh; 年损耗小时数取为 2000h;  $i$  取 10%;  $n$  取 15 年。

在本算例中, 染色体规模取为 100, 因为有 3 个目标函数, 所以其收敛空间是 3 维的, 规划的收敛情况如图 3、4 所示。当进化代数超过 50 代的时候, 解空间中的收敛曲线已基本不再变化, 说明已收敛到最优边界。表 1 列出了采用传统单目标单阶段遗传算法(取式(1)~(3)中  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  之和作为目标函数, 即:  $f = I_1 f_1 + I_2 f_2 + I_3 f_3$ , 比例系数  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  分别取 0.8, 1.0, 0.2)和多种群遗传算法所得到的规划方案及相关费用。在规划结果中发现: 3 种算法的目标函数值  $f_2$  均为 0, 即满足网络安全约束, 故不在表中列出。以上述比例系数取值在 NSGA-II 的 Pareto 解集中可找到同种群算法相同的规划方案, 该方案无论在线路投资还是总的年费用上都优于传统遗传算法的规划结果。

本文还分别对文献[4]的例题 8-5 的 18 节点、某实际 26 节点系统进行了规划。采用 2 个目标函数, 染色体规模均取为 100, 其解空间是 2 维的, 对 2 个系统的规划均得到了良好的收敛边界。



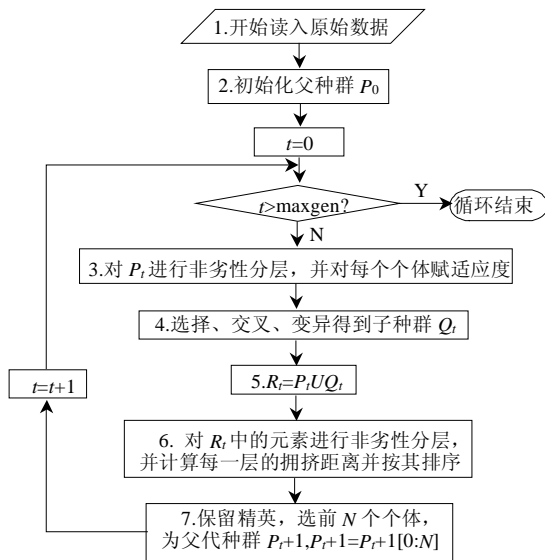


图2 NSGA-II 算法流程图  
Fig. 2 Flow chart of NSGA-II algorithm

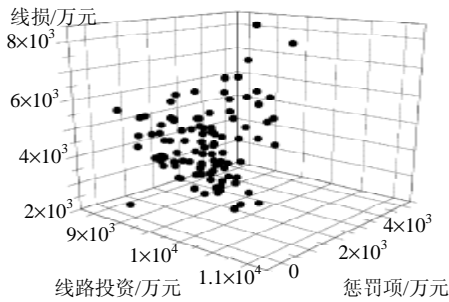


图3 初始种群在解空间情况  
Fig. 3 Initial population in objective space

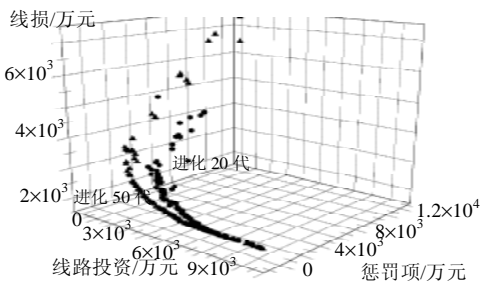


图4 进化20代(深色)和50代(浅色)解空间  
Fig. 4 Obtained solutions after 20 generations ( black) and 50 generations (gray) in objective space

表1 6节点系统规划方案费用表

Tab. 1 The optimal solutions of the 6-node system				
规划结果	新增线路	$f_1$ /万元	$f_2$ /万元	$f$ /万元
传统遗传算法	2-5(1);2-6(4);3-5(2); 3-6(1);4-6(3)	2162.74	2913.14	5075.78
NSGA-II 算法	2-6(4);3-5(2);	1958.93	3079.53	5038.46
同多种群算法	3-6(1);4-6(3)			

### 3 基于协同进化和 NSGA-II 相结合用于电网规划的设计实现

#### 3.1 协同进化算法

协同进化算法<sup>[10-11]</sup>(CCA)在传统进化算法的基

础上引入生态系统(ecosystem)的概念,将待求解的问题映射为相互作用的各物种组成的生态系统,以生态系统的进化来达到问题求解的目的。协同进化遗传算法与常规遗传算法的主要差别在于引入一层对于物种的循环。常规遗传算法是单一种群的算法,只需对一个种群进行各种遗传操作;而协同进化算法存在同时进化的多个种群,因此需要对多个种群轮流进行遗传操作。本文尝试将协同进化算法和 NSGA-II 算法相结合并应用于多区域大规模电网规划中。

#### 3.2 基于协同进化算法电网规划的设计

在电力系统优化问题中,协同进化算法应用的一种途径是采用图5所示的框架,对优化问题进行合适的分解,分别优化各子问题,并对各子问题的求解过程进行协调以达到整体问题求解的目的。在评估各子种群中个体的适应度值时,需将该个体与其它子种群中选出的代表个体组成整个系统优化问题的完整解,根据该完全解的优劣程度计算该个体的适应度值。各种群的进化和协调过程反复进行,直到进化停滞,找到优化问题的解。

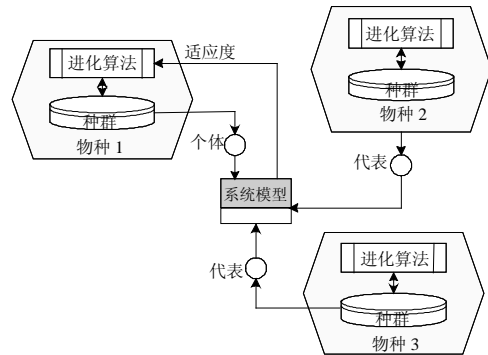


图5 协同进化算法框架  
Fig. 5 Framework of CCA

在输电网规划中,为考虑多区域(或大规模)联网的输电网规划,可先根据实际需要和网络框架特点将待规划电网分解成一系列子网,用不同进化算法分别优化各子区域的输电网方案,再用前述方法考虑多区域输电网的整体优化。本文采用此种方法,其中各分区域电网规划用 NSGA-II 算法进行优化。

算法设计步骤如下:

(1) 编码方式。同第2.1节所述方法,即采用逐线整数编码。对应各区域子网形成其相应的子种群,对子群体中的个体(线路)编码时,将其它子种群中选出的代表个体中所添加的线路作为已有线路来看待。

(2) 适应度的计算。计算某个区域子网中个体适应度值时,因将其它区域子网中选出的代表个

体中所添加的线路作为已有线路来看待, 这样对各个区域子网用 NSGA-II 算法规划时线路费用的计算只要考虑该区域添加线路的费用。其适应度函数应该反映全系统电网规划的目标和要求, 目标函数可以根据实际需要有所不同, 见第 1.1 节。

### 3.3 算例分析

为了验证协同进化和 NSGA-II 相结合算法对电网规划的可行性和有效性, 对某较大规模的实际系统<sup>[12]</sup>进行了规划, 该系统共有 71 个节点、100 条走廊、162 条待选线路。根据网络结构特点将该电网分成 2 个区域, 节点 1~37 划分到区域 1, 节点 38~71 划分到区域 2。为便于同传统遗传算法规划结果进行比较, 2 个区域的目标函数按式(1)、(2)建立。

在各个区域的进化过程中按  $\min = f_1 + f_2$  寻获各个区域的代表。通过所编制的程序进行计算, 规划结果见表 2, 其中常规遗传算法的染色体数为 100, 进化代数数为 500, 协同进化算法各区域染色体数均为 50, 各分区的进化代数均为 4, 协同进化代数数为 125。由表 2 可以看出: 同常规遗传算法相比, 协同进化和 NSGA-II 结合的算法所得结果在减少线路投资的同时, 也减少了系统 N-1 校验时的过负荷量, 优化结果更为合理。

表 2 71 节点系统规划结果  
Tab.2 The optimal solutions of the 71-node system

算法	添加线路数	$f_1$ /百万元	$f_2$ /百万元	$f_1 + f_2$ /百万元
常规遗传算法	136	3646.18	1326.96	4973.14
NSGA-II	139	3699.19	959.15	4658.34
协同进化和 NSGA-II 结合算法	129	3355.56	1252.02	4607.58

## 4 结语

本文对多目标和多区域电网规划进行了研究, 首次将 NSGA-II 算法应用于多目标输电网规划, 并提出了将协同进化和 NSGA-II 相结合进行多区域规划的算法。对多个算例进行了分析, 所得规划结果验证了这 2 种算法的有效性和合理性, 表明 NSGA-II 算法在多目标电网规划中具有乐观的应用前景; 协同进化和 NSGA-II 相结合的算法在大规模或区域互联电网规划中亦可以很好的发挥作用。当前随着电力系统规模的扩大和电力市场运营的兴起, 进行电网规划时需要考虑的因素必将越来越多, 如何进行电力市场下的输电网规划的建模, 国内外的学者正在积极的探索, 相信 NSGA-II 可以提供一个较好的算法支持。

## 参考文献

- [1] Srinivas N, Kalyanmoy Deb. Multi-objective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. *Evolutionary Computation*. 1994, 2(3): 221-248.
- [2] Zitzler E, Thiele L. Multi-objective optimization using evolutionary algorithm for multi-objective optimization[C]. *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway: New Jersey: IEEE Service Center. 1999, 98-105.
- [3] 陈皓勇, 王锡凡, 别朝红, 等. 协同进化算法及其在电力系统中的应用前景. *电力系统自动化*[J]. 2003, 27(23): 94-100.  
Chen Haoyong, Wang Xifan, Bie Chaohong, et al. Cooperative coevolutionary approaches and their potential applications in power systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(23): 94-100(in Chinese).
- [4] 王锡凡. *电力系统规划基础*[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.
- [5] Goldberg D E. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms[C]. In: *Foundations of Genetic Algorithms*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1991:69~93.
- [6] Hisashi Tamaki, Hajime Kita, Shigenobu Kobayashi. Multi-objective optimization by genetic algorithms: a review. in toshio fukuda and takeshi furuhashi[C]. *Proceedings of the 1996 International Conference on Evolutionary Computation(ICEC' 96)*. IEEE Nagoya, Japan: 1996. 517-522.
- [7] Kalyanmoy Deb, *Multiobjective optimization using evolutionary algorithms*[M]. Chichester, U. K: Wiley, 2001.
- [8] Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*[J]. 2002, 6(2): 182-197.
- [9] 杨青, 汪亮, 叶定友. 基于多目标遗传算法的固体火箭发动机面向成本优化设计. *固体火箭技术*[J]. 2002, 25(4): 16-20.  
Yang qing, Wang liang, Ye dingyou. Optimization design for cost of solid rocket motor based on multiobjective genetic algorithm[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2002, 25(4): 16-20(in Chinese).
- [10] 王博学, 王锡凡, 陈皓勇, 等. 基于协同进化法的电力系统无功优化. *中国电机工程学报*[J]. 2004, 24(9): 124-129.  
Wang Jianxue, Wang Xifan, Chen Haoyong, et al. Rective power optimization based on cooperative coevolutionary approach [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(9): 124-129(in Chinese).
- [11] Ceciliano J L, Nieva R. Transmission network planning using evolutionary programming[J]. *Proceedings of Evolutionary Computation*, 1999, (3): 1796-1803.
- [12] Gallego R A, Monticelli A, Romero R. Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm[J]. *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.* 1998, 145(3): 329-335.

收稿日期: 2006-03-02。

作者简介:

王秀丽(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析、优化规划及电力市场方面的研究, [xiuliw@mail.xjtu.edu.cn](mailto:xiuliw@mail.xjtu.edu.cn);

李淑慧(1979—), 女, 硕士, 从事电力系统优化规划方面的研究;

陈皓勇(1975—), 男, 副教授, 主要从事电力系统优化规划及电力市场方面的研究;

王锡凡(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析、优化规划及电力市场方面的研究;

梅 姚(1982—), 男, 硕士生, 从事电力系统优化规划方面的研究。

(责任编辑 喻银凤)